



توربین‌های باد مقیاس کوچک جریان متقاطع: مروری بر توسعه فناوری و کاربردها

زهرا سفیدگر^{۱*}، علی اشرفی‌زاده^۲، احمد عرب کوهسار^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

۳- دانشیار، دپارتمان انرژی، دانشگاه آلبورگ، اسبیرگ، دانمارک.

* تهران، ۱۳۴۵۹۱۷۸۳۱، Zahra.Sefidgar@email.kntu.ac.ir

چکیده

وسعت مناطق بادخیز در ایران، بستر مناسبی جهت بهره‌مندی از انرژی باد فراهم می‌کند. توربین‌های محور عمودی که به‌عنوان دسته‌ای از توربین‌های مقیاس کوچک شناخته می‌شوند؛ مورد توجه قرار گرفته و هر روزه توسعه بیشتری می‌یابند. یکی از انواع این توربین‌ها، که گزینه بسیار مناسبی برای کاربردهای شهری و خانگی به نظر می‌رسد، توربین جریان متقاطع (کراس فلو) است. به دلیل کوچک بودن نسبی حداکثر ضریب توان در توربین کراس فلو، روش‌هایی برای هدایت جریان باد به درون توربین پیشنهاد شده است. این مقاله به مرور مطالعات در حوزه طراحی و بهبود عملکرد توربین کراس فلو از طریق تغییر مشخصات هندسی توربین یا ارائه روش‌هایی برای هدایت جریان باد به درون توربین پرداخته است. پس از معرفی توربین کراس فلو، روش‌های هدایت جریان باد به درون توربین و میزان اثرگذاری هر کدام بر ضریب توان و عملکرد توربین بیان می‌شوند. این روش‌ها به ۷ دسته‌ی نازل راهنما، محفظه یا پوسته هدایت جریان، پره راهنما، منحرف‌کننده، روپوش، پره راهنمای چندجهته و زفیر تقسیم شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمده پژوهش‌ها به توسعه پره راهنمای چندجهته پرداخته‌اند. همچنین این توربین برای سه شهر اردبیل، بابلسر و زاهدان در ایران، براساس سه نوع سیستم (فروش مستقیم، متصل به شبکه و متصل به شبکه با باتری) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، سیستم فروش مستقیم بهترین گزینه برای بهره‌وری از توربین کراس فلو در ایران است و دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۱۰ سال تنها با کاهش قیمت توربین به ۱۰٪ الی ۲۹٪ قیمت کنونی حاصل می‌شود. کلیدواژگان: انرژی تجدیدپذیر، توربین بادی مقیاس کوچک، توربین کراس فلو، انرژی باد، ضریب توان

Cross-Flow Small Scale Wind Turbines: An Overview of Technology Development and Applications

Zahra Sefidgar^{1*}, Ali Ashrafizadeh², Ahmad Arabkoohsar³

1- MSc student, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Energy, Aalborg University, Esbjerg, Denmark.

* P.O.B. 1345917831, Tehran, Iran, Zahra.Sefidgar@email.kntu.ac.ir

Received: 2 March 2022 Accepted: 19 May 2022

Abstract

The vastness of windy areas in Iran provides many opportunities for harvesting energy from wind. Vertical axis turbines, mainly as a category of small-scale turbines, are attracting interest and being further developed every day. One of these types of turbines is the Cross-Flow wind turbine (CFWT), which is a quite suitable option for urban and home applications, though its low maximum power coefficient is yet a challenge that must be addressed by feasible methods. This article reviews studies in the field of design and improvement of CFWT by changing the geometric characteristics of the turbine or providing a way to direct the wind flow into the turbine rotor. After introducing the CFWT, the methods for directing wind flow into the turbine and their effect on the power coefficient and performance of the system are described. These methods are basically divided into seven categories of Guide nozzle, Casing, Guide vane, Deflector, Cowling, Omni-Directional Guide Vane (ODGV), and Zephyr. This study indicates that a big portion of the conducted research has been on the development of ODGV. Also, this turbine was analyzed for three cities of Ardabil, Babolsar, and Zahedan in Iran based on three types of systems (direct sale, on-grid, and on-grid with batteries). The results of this study show that the direct sale approach is the best option for the utilization of CFWT in Iran, and the payback period time of fewer than 10 years is achieved only by reducing the CAPEX of the setup by 10%-29%.

Keywords: Renewable energy, Small scale wind turbine, Cross-flow turbine, Wind energy, Power coefficient



۱- مقدمه

برای چند قرن زبان‌های وارده توسط سوخت‌های فسیلی به محیط‌زیست (مانند آلودگی هوا در شهرهای بزرگ، گازهای گلخانه‌ای و گرمایش زمین، سوانح معدنکاری و پایان‌پذیری این منابع) هشدار داده می‌شدند، اما بشر تا پیش از دهه ۱۹۷۰ میلادی (با جهش ناگهانی قیمت نفت و راه افتادن جنبش‌های نوپای محیط زیستی) در پی جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی‌های پاک نبود. استفاده از انرژی هسته‌ای، امید دستیابی به سوخت ارزان و فراوان به جای سوخت فسیلی را افزایش داد. اما به‌واسطه‌ی افزایش قیمت تمام شده، ایمنی، پسماندها و ساخت و استفاده از سلاح‌های کشتار جمعی، توسعه و گسترش انرژی هسته‌ای در طی سال‌ها به‌تدریج کاهش یافت. امروزه اکثر کشورها، انرژی هسته‌ای را جزو انرژی‌های پاک به شمار نمی‌آورند [۱].

عامل پایداری^۱ منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک عامل مهم در برابر سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای، در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. از دیدگاه نظری، منبع انرژی پایدار، منبعی است که با استفاده پیوسته، تمام نشود؛ الزاماً دارای آلودگی زیاد به‌صورت اثرگذار بر زیست محیط نبوده و همچنین دارای خطرات و صدماتی برای سلامتی انسان‌ها و یا بی‌عدالتی‌های اجتماعی نباشد. در عمل فقط تعداد محدودی از چشمه‌های انرژی دارای این ویژگی‌اند [۱]. در یک دسته‌بندی کلی، منابع انرژی پایدار و تجدیدپذیر شامل انرژی خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی، پیل‌های سوختی، زیست‌توده، برق‌آبی و ژنراتورهای گرمایی هستند که به‌منظور بهره‌وری جهت تولید انرژی الکتریکی به کار می‌روند. در دهه اخیر، انرژی بادی در جهان به یکی از پرطرفدارترین منابع انرژی پاک تبدیل شده است که انرژی از آن به دو شیوه نیروگاه‌های توربین‌های بادی و توربین‌های بادی مقیاس کوچک^۲ خانگی قابل استحصال است. به دلیل نیاز روزافزون جهانی به انرژی برق، توسعه توربین‌های بادی شتاب بیشتری گرفته، اما می‌توان گفت در حال حاضر صنعت توربین‌های بادی مقیاس کوچک، صنعتی در حال رشد، اصلاحات و توسعه فناوری است، که در آینده‌ای نزدیک ممکن است بتواند رقیبی برای سایر منابع تجدیدپذیر باشد.

براساس فاز صفر اطلس باد کشور، میزان انرژی قابل استحصال بادی در ایران بالغ بر ۴۰۰۰۰ مگاوات تخمین زده شده است. اما تاکنون در مجموع ۹۰۰ مگاوات ظرفیت در بخش نیروگاه‌های تجدیدپذیر احداث شده که از این رقم ۳۱۰ مگاوات نیروگاه بادی، ۳۹۰ مگاوات نیروگاه خورشیدی و بقیه در حوزه نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، زیست‌توده و توربین انبساطی است [۲]. برخی شهرها و روستا به‌خصوص در مناطق دورافتاده یا صعب‌العبور ایران از نظر قدرت باد وضعیت بسیار مطلوبی دارند، عدم دسترسی این مناطق به برق پایدار و افزایش نیاز بخش خانگی به برق، انگیزه خوبی برای استفاده از توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس را فراهم می‌کند، چراکه در برخی مناطق از ایران و جهان که انرژی حاصل از سرعت باد بسیار بیشتر از شدت تابش خورشید است؛ یکی از گزینه‌های معقول برای تولید انرژی پاک، استفاده از توربین بادی است.

۲- معیارها و ضرایب توربین بادی

برای مقایسه توربین‌های بادی به لحاظ هندسی و کارایی، معیارهای گوناگونی تعریف شده است که در زیر به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود.

معادله زیر ارتباط بین توان باد P_w و سرعت باد را نشان می‌دهد:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

ضریب نسبت سرعت نوک^۳: نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد را ضریب سرعت نوک گویند.

$$TSR \text{ or } \lambda = \frac{U}{V} = \frac{\omega R}{V} \quad (2)$$

نسبت منظری^۴: به نسبت ارتفاع توربین به قطر روتور گفته می‌شود. افزایش نسبت منظری، بازده را افزایش می‌دهد. در صورتی که قطر روتور توربین بزرگ باشد، گشتاور بیشتری به دست می‌آید اما سرعت دورانی کاهش می‌یابد و برعکس.

$$\text{Aspect Ratio} = \frac{H}{D} \quad (3)$$

زاویه حمله باد^۵: به زاویه حاده‌ای که بین امتداد وتر پره توربین و باد نسبی به وجود می‌آید، گفته می‌شود.

ضریب توان^۶: در توربین‌های بادی، باد به پره‌ها برخورد می‌کند، انرژی جنبشی باد آن‌ها را می‌چرخاند و نیروی مکانیکی تولید می‌شود که باعث چرخش محور اصلی توربین گردیده و این محور به یک ژنراتور برق متصل است. چرخش ژنراتور نیز، برق متناوب تولید می‌کند. ارتباط کلی بین توان باد و توان توربین بادی توسط ضریبی به نام ضریب توان یا C_p برقرار می‌شود که پارامتری متغیر با زاویه حمله باد α و ضریب سرعت نوک است، این ارتباط در معادله زیر نشان داده شده است:

$$P_t = P_w C_p(\lambda, \alpha) = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \alpha) \rho A V^3 \quad (4)$$

بنابراین در توربین‌های بادی اگر بتوان سرعت روتور را متناسب با سرعت باد طوری کنترل نمود که توربین در حداکثر ضریب توان خود کار کند، همواره در هر سرعت بادی می‌توان از حداکثر بازدهی توربین بادی بهره برد. ضریب گشتاور^۷: طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (5)$$

همچنین ضریب سرعت نوک، عامل ارتباط بین ضریب توان و ضریب گشتاور است.

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (6)$$

ضریب ظرفیت^۸: یعنی توربین بادی چه کسری از سال را با حداکثر ظرفیت کار می‌کند.

سرعت شروع توربین^۹: کمترین سرعت بادی که توربین در آن شروع به چرخش می‌کند و اگر باد کمتر از آن بوزد، دیگر پره‌های توربین نمی‌چرخند و برق تولید نمی‌شود.

سرعت قطع توربین^{۱۰}: بیشترین سرعت بادی است که توربین در آن کار می‌کند و اگر سرعت باد از آن تجاوز کند، جهت جلوگیری از آسیب و شکست، پره‌های توربین متوقف شده و توانی تولید نمی‌شود.

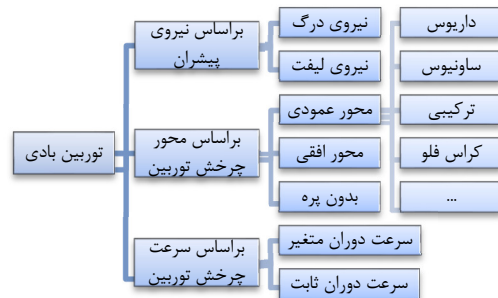
3. Tip Speed Ratio (TSR)
4. Aspect Ratio
5. Angle of Attack
6. Power Coefficient
7. Torque Coefficient
8. Capacity Factor
9. Cut-in Speed
10. Cut-off Speed

1. Sustainability
2. Small Scale



۳- تقسیم‌بندی و معرفی انواع توربین‌های بادی

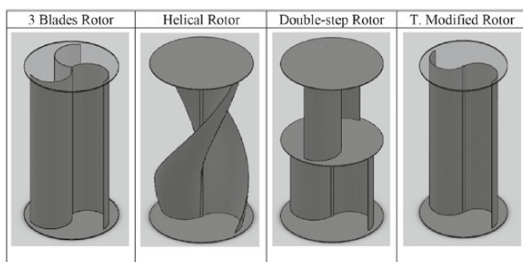
می‌توان انواع توربین‌های بادی را براساس معیارهای مختلف در یک نمای کلی به صورت زیر دسته‌بندی نمود.



شکل ۱ دسته‌بندی کلی توربین‌های بادی [۳]

۳-۲- ساوونیوس^۴

این توربین در سال ۱۹۲۹ توسط مهندسی فنلاندی اختراع شد [۱۰]. حداقل از دو نیم استوانه تشکیل شده است که نیروی پسا در ناحیه مقعر این روتورها بیشتر از قسمت محدب بوده که باعث گردش توربین حول محور خود می‌شود. شکل زیر شماتیکی از این توربین را نمایش می‌دهد. باوجود اینکه ضریب تبدیل توان برای دیگر انواع توربین‌های بادی بین ۳۰ تا ۴۵ درصد است اما تجربه نشان می‌دهد که در توربین ساوونیوس این ضریب حداکثر به ۲۵٪ می‌رسد [۱۱]. در نتیجه بازده آن نسبت به توربین داریوس کمتر است. بزرگترین مزیت آن در مقایسه با توربین داریوس، گشتاور بالای آن در آستانه حرکت توربین است [۱۲] که باعث می‌شود برای کاربردهای کوچک با سرعت‌های باد کم، مناسب باشد. سادگی، قابلیت اطمینان و تولید صدای کم نیز از سایر ویژگی‌های این توربین است.



شکل ۳ انواع مختلف پره‌های توربین ساوونیوس [۱۳]

توربین‌های بادی در مقیاس کوچک توربین‌هایی هستند که ظرفیت توان تا ۲۰ کیلووات دارند. جدول ۱ طبقه‌بندی توربین‌های بادی را براساس رتبه‌بندی توان نشان می‌دهد [۴].

جدول ۱ طبقه‌بندی توربین‌های بادی براساس قطر روتور و توان استاندارد آن‌ها [۴]

| طبقه‌بندی | قطر روتور (m) | نرخ توان استاندارد (kW) | کوچک مقیاس میکرو |
|------------------|---------------|-------------------------|------------------|
| کوچک مقیاس میکرو | ۰/۵ | ۰/۰۰۴ | ۰/۲۵ |
| مینی | ۱/۲۵ | ۰/۲۵ | ۱/۴ |
| خانگی | ۳ | ۱/۴ | ۱۶ |
| کوچک تجاری | ۱۰ | ۲۵ | ۱۰۰ |
| متوسط تجاری | ۲۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰۰ |
| بزرگ تجاری | ۵۰ | ۱۰۰۰ | ۳۰۰۰ |

۳-۳- توربین‌های هیبریدی^۵ (ترکیبی داریوس- ساوینیوس)

با توجه به اینکه توربین‌های بادی محور عمودی در مقیاس‌های بزرگ اقتصادی نیستند، در سال‌های اخیر تحقیق‌های زیادی در خصوص استفاده هم‌زمان از انواع ساوینیوس و داریوس، برای افزایش ضریب بهره‌برداری در توربین‌های بادی محور عمودی مقیاس کوچک^۶ انجام گرفته است [۱۶، ۱۵]. هدف اصلی از این نوع طراحی، افزایش ضریب توان توربین به واسطه وجود توربین داریوس و شروع به کار در سرعت‌های کم باد به واسطه وجود توربین ساوینیوس است [۱۶]. نمونه‌هایی از توربین‌های هیبریدی در شکل ۴ نشان داده شده است.



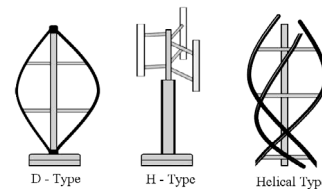
شکل ۴ انواع توربین‌های هیبریدی [۱۷]

۴-۳- سایر توربین‌های بادی کوچک مقیاس

در جدول ۲ به معرفی چند توربین بادی کوچک پرداخته شده و ویژگی‌های هر کدام به اختصار بیان می‌شوند.

۳-۱- داریوس^۱

توربین بادی داریوس در سال ۱۹۳۱ توسط مهندس فرانسوی به نام جورج مری جین داریوس^۲ اختراع شد [۵]. وی دو مدل از این توربین یعنی پره منحنی (D-Type) و پره‌های صاف (H-Type) یا گیرومیل^۳ را ثبت کرد. این توربین به وسیله نیروی لیفت که در پره‌ها ایجاد می‌شود، به گردش درمی‌آید [۶]. بازده تئوری آن ۵۵/۴٪ است. در حالی که بازده توربین‌های محور افقی ۵۹/۳٪ است [۷]. این توربین نمی‌تواند خیلی بالاتر از سطح زمین نصب شود؛ در نتیجه، سرعت بادی که روتور حس می‌کند، بسیار کم است و اگر توربین در ابتدا ساکن باشد، در اثر وزش باد به تنهایی نخواهد چرخید و نیاز به چرخش ابتدایی پره‌ها تا سرعت مشخصی دارد [۸]، اما مزیت آن این است که ژنراتور و دیگر اجزا بر روی زمین نصب می‌شوند، پس نگهداری و تعمیر آن‌ها ساده‌تر است.



شکل ۲ انواع مختلف پره‌های توربین داریوس [۹]

4. Savonius
5. Hybrid
6. Small Scale Vertical Axis Wind Turbine

1. Darrieus
2. Georges Jean-Marie Darrieus
3. Giromill

نصب توربین به میزان فضای در دسترس و مشخصات محل نصب بستگی دارد. بهترین نقاط جهت نصب، بر روی پشت‌بام‌های شیروانی و در مرحله دوم پشت‌بام‌های مسطح ساختمان‌هاست.



(الف) (ب)

شکل ۶ توربین کراس فلو نصب‌شده در بام منازل در اروپا در حالت الف) محور عمودی و ب) محور افقی [۲۶]

یکی از کاربردهای این توربین، تولید انرژی از جریان هوای ایجادشده به‌واسطه رفت‌وآمد خودروها در بزرگراه‌ها و خیابان‌های پرتردد است، مطابق شکل ۷ می‌توان با نصب تعداد زیادی توربین در جزیره میانی^۹ بزرگراه‌ها انرژی پاک تولید کرده و از آن در روشنایی چراغ‌ها، علائم راهنمایی و دوربین‌های کنترل ترافیک و یا جهت تأمین انرژی در ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی استفاده کرد [۲۸، ۲۷]. همچنین می‌توان از انرژی تولیدی این توربین به‌عنوان منبع تأمین روشنایی برای چراغ‌های عابر پیاده، چراغ‌های موجود در فضاهای سبز و پارک‌ها استفاده کرد.



شکل ۷ کاربرد توربین در روشنایی معابر و ایستگاه شارژ وسایل نقلیه الکتریکی [۲۶]

۴-۱- مزایای توربین کراس فلو

توربین کراس فلو دارای ضریب گشتاور بالا در نسبت سرعت پایین است؛ بنابراین، کاندید مناسبی برای استفاده به‌عنوان توربین خود راه‌انداز^{۱۰} است. سر و صدای کم، ثبات عالی و سرعت شروع کمتر از ۲ متر بر ثانیه دارد. همه موارد ذکرشده، این توربین را از نظر کاربرد به گزینه مناسبی برای استفاده در مناطق شهری تبدیل می‌کند. همچنین به دلیل ساختار ساده، هزینه تعمیر و نگهداری کمی دارد. برخلاف توربین‌های محور افقی یا محور عمودی مانند داریوس و سانویوس خطری برای پرندگان در حال پرواز به شمار نمی‌رود. با توجه به مساحت و ساختار فضای مورد نظر، می‌توان از شیوه‌های مختلفی برای نصب استفاده کرد، به‌علاوه به دلیل سرعت شروع پایین، این قابلیت را

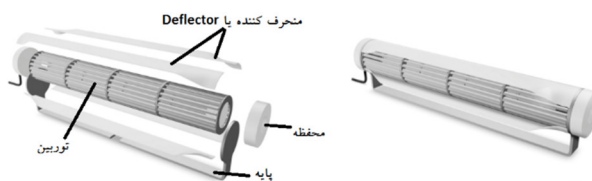
9. Refuge
10. Self-starting

جدول ۲ سایر توربین‌های کوچک‌مقیاس و ویژگی آن‌ها

| نام توربین بادی | ویژگی | تصویر |
|-------------------------------|---|-------|
| پیچ ارشمیدس [۱۸] | عدم حساسیت به آشفتگی، عدم حساسیت به جهت باد، بازده بالا، سر و صدای کم | |
| سوئیت ^۱ [۱۹] | سر و صدای کم به خاطر وجود دیفیوزر دایره‌ای، کارکرد یکنواخت در سرعت‌های بالای باد | |
| اکوو وسپر ^۲ [۲۰] | قادر به تولید ۲۰ کیلووات برق است، سر و صدای کم، بازده ۳۰٪ بیشتر نسبت به طرح‌های سنتی | |
| نئو ویند 3D ^۳ [۲۱] | سر و صدای کم، مقاومت در سرعت‌های بالای باد، ظاهر زیبا، عملکرد مناسب در سرعت باد کم | |
| اوکانر هاش ^۴ [۲۲] | بازدهی بالا در سرعت کم باد، مقاومت بالا در برابر بادهای شدید، هزینه کم تعمیر و نگهداری، صدمه زدن به پرندگان | |
| ویندکور ^۵ [۲۳] | بازدهی بالا در سرعت کم باد، سر و صدای کم، ظاهر زیبا، ابعاد کوچک و قدرتمند | |
| ویندساید ^۶ [۲۴] | بازده بالا، سر و صدای کم، هزینه کم تولید، عدم حساسیت به آشفتگی | |

۴-۲- معرفی توربین بادی جریان متقاطع یا کراس فلو^۷

این توربین از تعدادی پره سانویوس به شکل کلی استوانه‌ای ساخته شده است، عموماً تعداد ۱۰ الی ۲۴ پره برای این توربین در نظر گرفته می‌شود، باین‌وجود براساس قطر روتور، راندمان و محدوده‌ی سرعت شروع و قطع توربین تعداد پرها می‌توانند متفاوت باشند. اجزای توربین در شکل ۵ نشان داده شده است. پره‌های توربین بر روی پایه محکم شده و برای افزایش راندمان توربین، از صفحاتی برای هدایت جریان هوا به سمت پرها استفاده می‌شود، این صفحات در شکل، اندازه و زاویه‌های مختلف ساخته می‌شوند، در شکل ۵ صفحه‌ای تحت عنوان منحرف‌کننده^۸ نمایش داده شده است.



شکل ۵ ساختار داخلی توربین کراس فلو با پایه، محفظه و منحرف‌کننده‌ها [۲۵]

شیوه نصب توربین کراس فلو به دو صورت محور عمودی (ایستاده) یا محور افقی (نشسته) مطابق شکل ۶ صورت می‌گیرد، نحوه‌ی انتخاب شیوه

1. Swift
2. Eco whisper
3. Nheowind3D
4. O'connor hush
5. Wind core
6. Wind side
7. Cross flow
8. Deflector



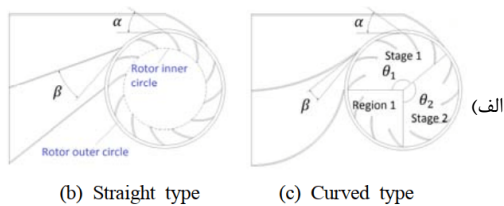
باد به درون توربین، عملکرد آن را بهبود بخشند. در ادامه به روش‌هایی که جهت افزایش کارایی توربین به کار گرفته شده است، اشاره می‌شود.

۱-۵- نازل راهنما^۶

با قرار دادن یک نازل همگرا در مقطع ورودی توربین، سرعت باد در هنگام برخورد به پره‌ها افزایش یافته و راندمان نیز افزایش می‌یابد. این روش به‌طور گسترده در توربین‌های آبی استفاده می‌شود، اما برای توربین‌های بادی به دلیل تغییر زاویه دائمی وزش باد کاربرد کمی دارد. شیخا^۷ و همکارانش [۳۳] از یک نازل همگرا مطابق شکل ۹ برای متمرکز کردن جریان باد و افزایش توان توربین که مناسب برای مناطق با سرعت باد کم است، استفاده کردند. در مطالعه تونل باد، دو پارامتر تعداد پره روتور و ابعاد نازل (طول و نسبت سطح مقطع ورودی به خروجی) را آزمایش کردند، نتیجه بهینه در ۶ پره ساونوس، طول نازل ۵۵ سانتیمتر و نسبت ورودی به خروجی ۰/۱۵ به دست آمد که سرعت باد را ۳/۷ برابر افزایش می‌دهد. شکل ۱۰ پژوهش انجام‌شده دیگری توسط سون^۸ را نشان می‌دهد که از دو نازل منحنی و مستقیم استفاده کرده و پس از شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی به این نتیجه رسیده که نازل منحنی، کارایی بیشتری نسبت به نازل مستقیم داشته و موجب دو برابر شدن ضریب توان ($C_{pmax}=0.265$) می‌شود [۳۴].

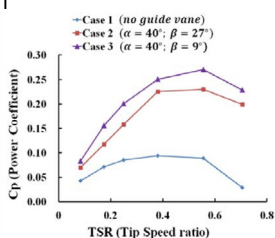


شکل ۹ روتور ۶ پره‌ای با نازل همگرا [۳۳]

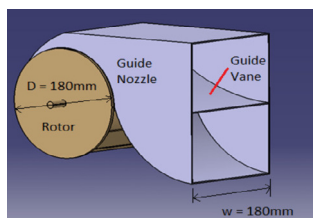


(b) Straight type

(c) Curved type



(ج)



(ب)

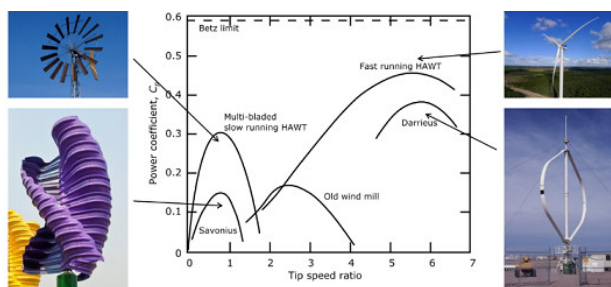
شکل ۱۰ نمای جانبی از توربین به همراه دو نوع نازل منحنی و مستقیم، (ب) تصویر سه بعدی از توربین و نازل راهنما (ج) منحنی عملکرد توربین [۳۴]

6. Guide Nozzle
7. Shikha
8. Son

دارد که در ارتفاع‌های کم (۰/۵ الی ۱۰ متری سطح زمین) نیز نصب شود [۲۹].

۲-۴- معایب توربین کراس فلو

حداکثر ضریب توان این نوع توربین در حدود ۰/۱۲ است و در مقایسه با سایر توربین‌های بادی مطابق شکل ۸ بسیار کم است، اما با استفاده از منحنی‌کننده‌ها، پره‌های راهنما^۱ و محفظه‌های^۲ طراحی شده می‌توان ضریب توان آن را افزایش داد. در سرعت‌های بالای باد (حدوداً بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه) قادر به تولید انرژی نیست، به دلیل اینکه توربین کراس فلو جزو توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس بوده و نسبت به توربین‌های صنعتی از جنس ماده ضعیف‌تر، سبک‌تر، با مقاومت کمتر و ارزان‌تری ساخته شده است؛ پس انتظار می‌رود در محدوده‌ی سرعت‌های بالا، چرخش پره متوقف شود تا از آسیب به قطعات توربین جلوگیری گردد [۲۹].



شکل ۸ نمودار $C_p - \lambda$ برای توربین‌های بادی با شرایط ایده‌آل و به‌دست‌آمده از مدل‌های اصلاح‌شده [۳۰]

۵- پژوهش‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده

پژوهش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی بسیاری پیرامون توربین کراس فلو انجام شده است. برای مثال کونو^۳ و همکارانش [۳۱] مشخصات و ویژگی‌های جریان سیال اطراف توربین را با روش آزمایشگاهی و دینامیک سیالات محاسباتی CFD بررسی کردند. همچنین کاوامورا^۴ و همکارش [۳۲] در تحلیل عددی به بررسی میدان سرعت و فشار در اطراف یک توربین کراس فلو ۱۲ پره‌ای پرداختند.

یکی از پژوهشگران مطرح این زمینه تjahjana^۵ است که به همراه گروه تحقیقاتی‌اش در طول چندین سال، تأثیر سرعت‌های مختلف باد، شرایط هندسی پره توربین و همچنین نوع چیدمان توربین‌ها برای دستیابی به حداکثر ضریب توان و ضریب گشتاور را بررسی کردند. این بررسی‌ها در حالت نصب به‌صورت محور عمودی بودند. جدول ۳ پژوهش‌های انجام‌شده آن‌ها را به همراه روش تحقیق و نتایج به‌دست‌آمده، نشان می‌دهد.

اساساً باد طبیعت متغیری دارد و زاویه وزش و سرعت آن هر لحظه عوض می‌شود، همین تغییرات در مناطق شهری با وجود موانع (ساختمان‌های بلند و درختان) تشدید شده و باعث ایجاد جریان‌های آشفتنه و چند جهت‌سیال می‌شود. در نهایت جریان‌های اغتشاشی سیال با ورود به توربین، موجب کاهش راندمان آن می‌گردند. برای جلوگیری از این موضوع، پژوهشگران بسیاری تلاش کردند تا با طراحی و بهینه‌سازی پره‌های هدایت‌کننده جریان

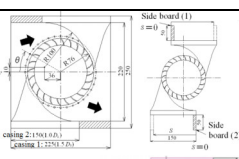
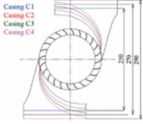
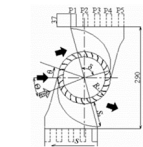

1. Guide Vane (GV)
2. Casing
3. Kono
4. Kawamura
5. Tjahjana



جدول ۳ پژوهش‌های انجام شده توسط تjahajana و همکارانش

| محققان | سال | روش تحقیق | توضیحات | نتایج |
|--|------|---------------|---|--|
| آریفین ^۱ و همکاران [۳۵] | ۲۰۲۱ | آزمایشگاهی | تأثیر تعداد پره (۱۲، ۱۶ و ۲۰)، تأثیر چیدمان به صورت پشت‌هم در جهت چرخش مخالف | حداکثر Cp=0.169 با ۱۲ پره در ۱۰ متر بر ثانیه است. چیدمان پشت‌هم و چرخش مخالف باعث افزایش عملکرد می‌شود. |
| پرتیوی ^۲ و همکاران [۳۶] | ۲۰۲۰ | آزمایشگاهی | تأثیر سرعت باد و تأثیر چیدمان به صورت پشت سرهم | در فاصله ۲/۵ برابر قطر و $V_{m/s}$ ، Cpmax برای توربین بالادست ۰.۱۲۲ و برای توربین پایین دست ۰/۰۸۲ است. |
| فرهودین ^۳ و همکاران [۳۷] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | تأثیر تعداد طبقات توربین (۱، ۰ و ۲ طبقه) و زاویه تغییر فاز (۶، ۰ و ۱۲ درجه) بر ضریب توان | حداکثر Cp=0.13 در یک طبقه توربین و حداکثر Cp=0.12 در زاویه ۱۲ درجه قابل دستیابی است. |
| کورنیواتی ^۴ و همکاران [۳۸] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | تأثیر تعداد پره (۸، ۱۶ و ۲) | حداکثر Cp=0.12 و TSR=0.59 و تعداد ۱۶ پره |
| مک‌رایم ^۵ و همکاران [۳۹] | ۲۰۱۸ | تحلیل عددی 2D | تأثیر تعداد پره (۱۶، ۱۹ و ۲۲) و نسبت عمق پره | حداکثر Cp=0.187 در TSR=0.436، تعداد ۱۶ پره و نسبت عمق پره ۱۰٪ |
| اکتاویتاساری ^۶ و همکاران [۴۰] | ۲۰۱۸ | تحلیل عددی | تأثیر چیدمان هم‌راستا و پراکنده | پراکنده، ۱۰٪ چگالی توان بیشتری تولید می‌کند. |
| سانتوسو ^۷ و همکاران [۴۱] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | شعاع و زاویه پره | حداکثر Cp=0.41 در TSR=0.76، شعاع ۶۰ میلی‌متر و زاویه پره ۴۵ درجه |
| سوسانتو ^۸ و همکاران [۴۲] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | تأثیر تعداد پره (۱۶، ۲۰ و ۲۴) و نسبت قطر داخلی به خارجی (۰/۵۸، ۰/۶۳، ۰/۶۸ و ۰/۷۳) | حداکثر Cp=0.049 در TSR=0.34، تعداد پره ۲۰ و نسبت قطر ۰/۶۸ |
| تجاهجانا ^۹ و همکاران [۴۳] | ۲۰۱۸ | تحلیل عددی 2D | تأثیر تعداد پره (۱۶، ۲۰ و ۲۴) و نسبت قطر داخلی به خارجی (۰/۵۸، ۰/۶۳، ۰/۶۸ و ۰/۷۳) | حداکثر Cp=0.5 در TSR=0.3 و نسبت قطر ۰/۶۸ |
| ویبوو ^{۱۰} و همکاران [۴۴] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | تأثیر زاویه شیب ODGV (۲۰° و ۶۰°)، تعداد پره‌های راهنما (۸، ۱۲ و ۱۶) و توربین (۸، ۱۲ و ۱۶) | ماکزیمم ۲۷٪ افزایش در تولید توان نسبت به حالت اولیه. حداکثر Cp=0.1 در TSR=0.28، زاویه ۶۰ درجه، تعداد پره راهنما ۱۶ و توربین ۱۶ |
| ویکاکسونو ^{۱۱} و همکاران [۴۵] | ۲۰۱۸ | آزمایشگاهی | تأثیر وجود ODGV، تأثیر زاویه وزش باد (۳۰°، ۵۰° و ۶۰°) | ۲۱.۴۶٪ افزایش در Cp با وجود ODGV و حداکثر Cp=0.125 در زاویه وزش باد ۶۰ درجه |

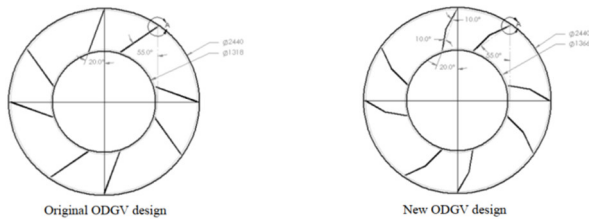
جدول ۴ شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی توربین‌های دارای محفظه یا پوسته هدایت جریان

| محققان | روش تحقیق | پارامترهای متغیر | شکل محفظه | نتایج |
|---------------------------------------|-------------------|---|---|---|
| شیگمیتسو ^{۱۲} و همکاران [۵۱] | عددی و آزمایشگاهی | شکل محفظه: محفظه ۱ یا محفظه ۲. محل قرارگیری تخته جانبی: ابتدا یا انتهای محفظه |  | محفظه شماره ۲ با تخته جانبی در انتها، در زاویه باد ۳۰ درجه نسبت به افق، ماکزیمم ضریب توان ۰/۱۹ را در پی دارد. |
| فوتوکومی ^{۱۳} و همکاران [۴۶] | عددی و آزمایشگاهی | شکل محفظه: محفظه شماره C1 تا C4 |  | ماکزیمم ضریب توان ۰/۱۹ با محفظه C2 که ۹۴٪ بیشتر از حالت بدون محفظه است. |
| شیگمیتسو و همکاران [۴۷] | عددی و آزمایشگاهی | محل قرارگیری تخته جانبی بر روی محفظه: تخته جانبی شماره P1 تا P5 |  | ماکزیمم توان ۰/۱۷ با P5 به دست آمد، که نسبت به حالت روتور بدون محفظه و تخته جانبی ۷۲٪ افزایش دارد. |
| تاکیچی ^{۱۴} و همکارانش [۵۲] | عددی و آزمایشگاهی | شکل محفظه: محفظه ۱ یا محفظه ۲ |  | افزایش ۱/۵ برابری ضریب توان (حداکثر ۰/۲۲) در حالت وجود محفظه شماره ۲ نسبت به نبود آن حاصل شده است. |

1. Arifin
2. Pertiwi
3. Fahrudin
4. Kurniawati
5. Makarim
6. Oktavitasari
7. Santoso
8. Susanto
9. Tjahjana
10. Wibowo
11. Wicaksono
12. Shigemitsu
13. Fukutomi
14. Takeuchi



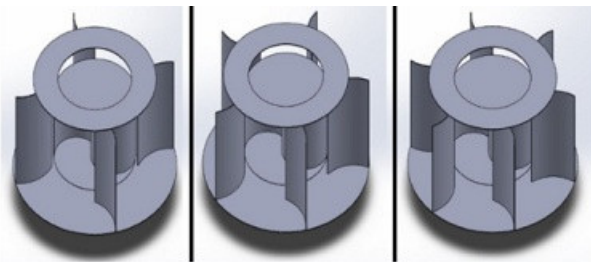
۵-۶- پره راهنمای چندجهته^۱



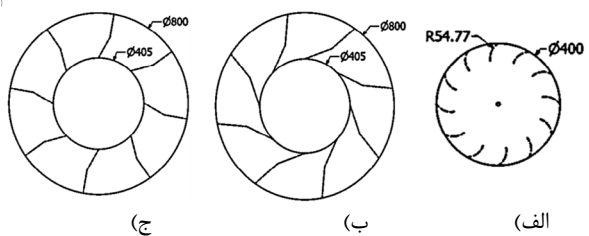
شکل ۱۵ پره راهنمای چندجهته ارائه‌شده توسط وونگ و همکارانش [۵۸]



شکل ۱۶ الف) پره راهنما خطی، ب) پره راهنما مستقیم و ج) پره راهنما منحنی [۵۹]



شکل ۱۷ محفظه راهنما با تعداد ۴، ۵ و ۶ پره جهت‌دار [۶۰]



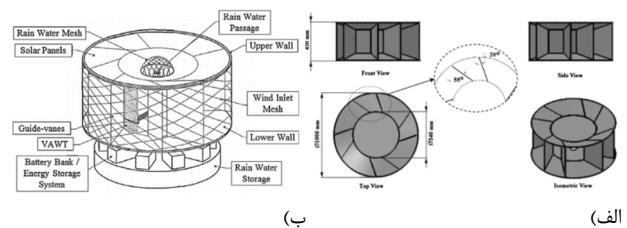
شکل ۱۸ الف) هندسه توربین، ب) پره‌های راهنما با زاویه شیب ۲۰ و ج) پره‌های راهنما با زاویه شیب ۶۰ [۴۴]

طرح مشابه دیگری توسط نابل^۴ و همکارانش [۶۱] ارائه‌شده که در آن ۸ پره ثابت از نوع ایرفویل NACA0018 بوده تا دبی جرمی سیال را در کنار روتور متمرکز کند و دیواره‌های بالا و پایین به شکل مخروطی بوده تا لبه‌های بیرونی این دیواره‌ها، سبب اختلاط جریان آشفته در بالا و پایین استاتور به‌منظور کاهش فشار برگشتی در داخل استاتور و افزایش توان خروجی توربین شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میانگین ضریب توان و ضریب گشتاور حدود ۳۰٪ الی ۳۵٪ نسبت به حالت بدون استاتور افزایش یافته است.

یکی از محدودیت‌های اصلی طرح‌های مذکور این است که فقط برای جریان‌های باد تک‌سویه کاربرد دارند، به همین دلیل مکانیزم چرخاننده مورد نیاز است، در صورتی‌که در واقعیت باد از هر سمتی می‌وزد و مکانیزم چرخاننده چندان کارآمد ظاهر نمی‌شود. یکی از روش‌های افزایش عملکرد توربین، استفاده از محفظه‌ای دارای چندین پره راهنماست. مطابق شکل ۱۴ این محفظه از دیواره بالایی و پایینی به همراه چند پره راهنما تشکیل شده است. پره‌های راهنما ثابت بوده و براساس زاویه حمله پره‌های توربین طراحی می‌شوند تا خاصیت خود راه‌اندازی توربین را بهبود ببخشند، همچنین گشتاور منفی و نوسانات سرعت چرخشی توربین را کاهش می‌دهند. عدم نیاز به مکانیزم چرخاننده، سرعت شروع پایین توربین و افزایش سرعت زاویه‌ای از مزایای این طرح است.

ویکسونو و همکارانش [۴۵] در یک پژوهش آزمایشگاهی تأثیر وجود این طرح را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که ضریب توان ۲۱/۴۶٪ افزایش می‌یابد. چونگ^۲ و همکارانش [۵۸، ۵۷]. تحلیل عددی و آزمایشگاهی برای محفظه راهنما به همراه ۴ جفت پره راهنما با زاویه ۲۰ و ۵۵ درجه، مطابق شکل ۱۴ انجام دادند، نتایج آن‌ها افزایش ۱۸۲٪ سرعت زاویه‌ای پره‌های توربین را نشان داد. اگر این ۴ جفت پره راهنما در وسط با زاویه ۱۰ درجه شکستگی داشته باشند (شکل ۱۵)، موجب کاهش سرعت شروع و بهبود خود راه‌اندازی توربین شده و ضریب توان افزایش ۳۱/۶٪ نسبت به پره راهنما بدون شکستگی و ۱۴۷/۱٪ نسبت به توربین بدون پره راهنمای چندجهته خواهد داشت [۵۸].

همچنین پره راهنمای منحنی ۴۸٪ و پره راهنمای مستقیم ۵۱/۴٪ افزایش ضریب توان نسبت به توربین بدون پره راهنمای چندجهته را دارند [۵۹]. تعداد پره‌های راهنما و زاویه شیب آن‌ها نیز بر ضریب توان و ضریب سرعت نوک مؤثرند، در آزمایشی که با پارامترهای ۴، ۵ و ۶ پره راهنما در زوایای شیب ۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درجه انجام شده، حالت بهینه تعداد ۶ پره راهنما در زاویه شیب ۶۰ درجه معرفی شد [۶۰]. به‌علاوه در آزمایش جداگانه دیگری که با تمرکز بر روتور کراس فلو بوده، حالت بهینه تعداد ۱۶ پره توربین با ۱۶ پره راهنما در زاویه شیب ۶۰ درجه به‌دست‌آمده که ۴۹٪ افزایش ضریب توان نسبت به توربین بدون پره راهنما را دارد [۴۴].



شکل ۱۴ الف) دیاگرام پره راهنمای چندجهته و ب) ایده سامانه تولید انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی-باتری ارائه‌شده توسط چونگ و همکارانش [۵۶]

4. Nobile

1. Omni-Directional Guide Vane (ODGV)
2. Chong
3. Tilt angle

که به نوع سیستم انتخابی (شکل ۲۱) بستگی دارد. همچنین قیمت هر عدد توربین کراس فلو با ظرفیت ۵۰۰ وات در بازار جهانی، حدود ۳۰۰۰ دلار است [۶۹].

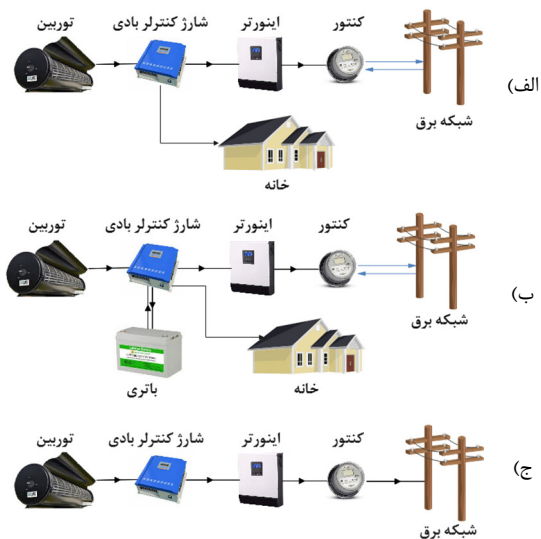
داده‌های هواشناسی اعم از دمای هوا، سرعت و جهت باد به صورت ساعتی در طول یک سال جمع‌آوری شده‌اند، جدول ۵ اطلاعات آب و هوایی شهرهای منتخب را نشان می‌دهد.

رابطه (۸) به توان تولیدی توربین نیاز دارد، برای این منظور از رابطه (۴) استفاده می‌شود، که در آن V براساس سرعت و جهت باد جایگذاری می‌گردد. ضریب C_p از نمودار ضریب عملکرد توربین [۵۱] و چگالی هوا از روابط (۹) و (۱۰) به دست می‌آید. در این روابط، h ارتفاع از سطح دریا برحسب متر، T دمای هوا برحسب کلونین، $P_0=101325\text{pa}$ فشار استاندارد اتمسفر در سطح دریا، $M=0.028969\text{kg/mol}$ جرم هوای خشک، $R=287.058\text{J/kg.k}$ ثابت ویژه گاز برای هوای خشک و $R_0=8.314\text{J/kg.k}$ ثابت جهانی گازهاست.

$$\rho = \frac{P'(pa)}{\bar{R} \left(\frac{j}{kg.K} \right) T(K)} \quad (9)$$

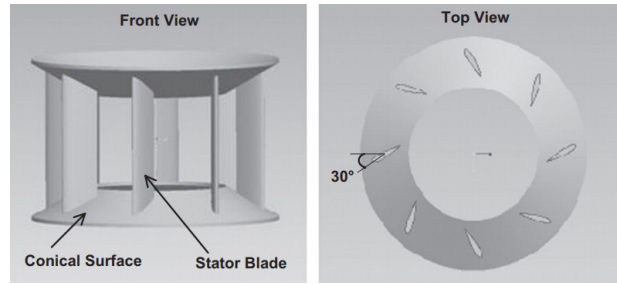
$$P' = P_0 e^{\left(\frac{-ghM}{TR_0} \right)} \quad (10)$$

همچنین سرعت شروع و سرعت قطع توربین به ترتیب $1/2$ و $1/64$ متر بر ثانیه است. سه نوع سیستم مطابق شکل ۲۱ در نظر گرفته شده است. شکل ۲۱ الف، سیستم توربین بادی خانگی متصل به شبکه را نشان می‌دهد که در مواقع نیاز و اوج بار، انرژی تولیدی توربین صرف تأمین نیازهای خانه شده و در ساعات غیر اوج بار به شبکه شهری فروخته می‌شود. شکل ۲۱ ب، توربین بادی خانگی در حالت متصل به شبکه با باتری از نوع لیتیوم یون است. شکل ۲۱ ج نیز سیستم فروش مستقیم است که تمامی انرژی تولیدی توربین در لحظه به شبکه شهری فروخته می‌شود.



شکل ۲۱ نمایشی از سیستم (الف) متصل به شبکه، (ب) متصل به شبکه با باتری و (ج) فروش مستقیم

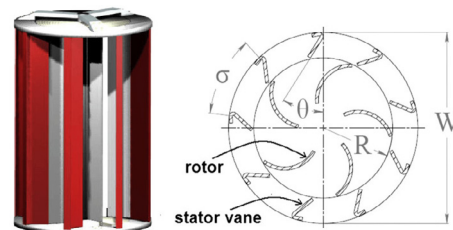
با استفاده از رابطه (۷) برای ۸۷۶۰ ساعت در طی یک سال، در سه شهر و سه سیستم، دوره بازگشت سرمایه برحسب درصد کاهش قیمت توربین به دست آورده شده است که در قالب شکل ۲۲ و جدول ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۹ نمای بالا و جلو از استاتور ارائه شده توسط نابل و همکارانش [۶۱]

۷-۵- زفیر^۱

این طرح شامل ۹ پره ثابت مطابق شکل ۲۰ است که در اطراف توربین کراس فلو قرار می‌گیرد، آشفتگی جریان را کاهش می‌دهد و جهت جریان باد را به یک زاویه خاص تغییر می‌دهد تا توربین بتواند انرژی بیشتری را از باد جذب کند. نمونه شبیه‌سازی شده عددی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و آزموده شده آزمایشگاهی نشان می‌دهد که زفیر می‌تواند، ضریب توان را از ۰/۹۸ به ۰/۱۲ افزایش دهد [۶۳،۶۲].



شکل ۲۰ نمونه اولیه زفیر [۶۳،۶۲]

۶- بررسی استفاده از توربین کراس فلو در اقلیم ایران

برای بررسی امکان استفاده و آنالیز اقتصادی بهره‌وری از توربین کراس فلو در ایران، سه شهر از اقلیم‌های مختلف شامل بابلسر (معتدل)، اردبیل (سردسیر) و زاهدان (گرمسیر) انتخاب شده‌اند. برای هر کدام از شهرهای مذکور در ساختمانی مسکونی، سه نوع سیستم که شامل توربین کراس فلو (شکل ۲۱) است، شبیه‌سازی شده است. برای تعیین بهترین اقلیم و سیستم جهت بهره‌وری از توربین کراس فلو، از آنالیز اقتصادی استفاده می‌شود. یکی از معیارهای مناسب برای آنالیز اقتصادی یک طرح، دوره بازگشت سرمایه^۲ است که از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$PBP = \frac{C_{Initial}}{C_{Reduced}} \quad (7)$$

$$C_{Reduced} = EL_{Demand} \times EL_{Price} - (EL_{Bought} \times EL_{Price} - EL_{sold} \times g_{Price}) \quad (8)$$

در رابطه بالا EL_{Demand} میزان برق مورد تقاضای خانه بدون وجود توربین بادی، EL_{Bought} مقدار برق خریداری شده از شبکه و EL_{sold} مقدار مازاد برق تولیدی توربین که به شبکه برق شهری فروخته می‌شود، هستند. EL_{Price} تعرفه خرید برق برای مشترکان مسکونی از شبکه شهری است. برای سیستم توربین بادی با ظرفیت یک مگاوات و کمتر، نرخ تضمینی خرید برق از سوی وزارت نیرو یا g_{Price} در رابطه (۸)، برابر ۱۰۳۷۴ ریال بر کیلووات ساعت است که این نرخ در طول ۷ سال گذشته به طور متوسط ۱۳/۱۷٪ افزایش قیمت سالانه داشته است [۶۸-۶۴]. به علاوه $C_{Initial}$ هزینه اولیه سرمایه‌گذاری است

1. Zephyr
2. Payback Period (PBP)

جدول ۵ شرایط آب و هوایی شهرها

| شهر | ارتفاع (m) | میانگین سرعت باد (m/s) | واریانس سرعت باد (m/s) | دمای خشک طراحی تابستانی | دمای مرطوب طراحی تابستانی | تغییرات دمایی روزانه در تابستان | دمای خشک طراحی زمستانی | دمای مرطوب طراحی زمستانی |
|--------|------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|
| بابلسر | ۲۱- | ۲/۱۳۵ | ۲/۰۵۲ | ۳۱/۵ | ۲۵/۸ | ۷/۷ | ۰/۰ | -۰/۴ |
| اردبیل | ۱۳۵۱ | ۳/۸۷ | ۲/۴۶ | ۲۹/۷ | ۲۰/۲۶ | ۱۶/۰۴ | -۲۱/۹ | -۲۲/۴ |
| زاهدان | ۱۳۸۰ | ۳/۴۸ | ۲/۰۵ | ۳۷/۵ | ۱۷/۲ | ۱۶/۷ | -۷ | -۸/۲ |

جدول ۶ دوره بازگشت سرمایه در سه سناریو برحسب کاهش قیمت توربین

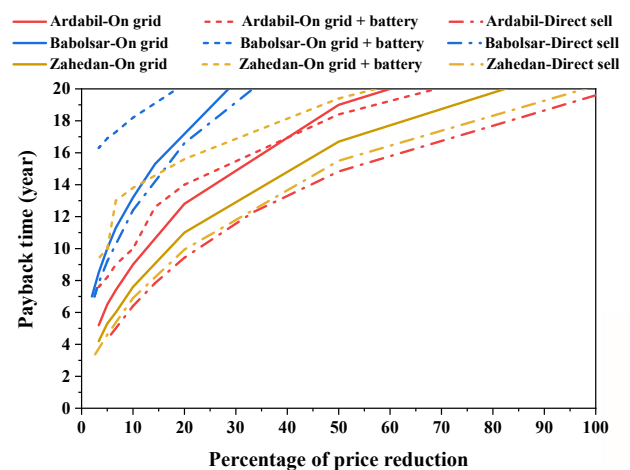
| شهر | قیمت کنونی | | ۵۰٪ قیمت کنونی | | ۱۰٪ قیمت کنونی | |
|--------|--------------|----------|----------------|----------|----------------|----------|
| | متصل به شبکه | | متصل به شبکه | | متصل به شبکه | |
| | بدون باتری | با باتری | بدون باتری | با باتری | بدون باتری | با باتری |
| اردبیل | ۱۹/۶ | - | ۱۴/۸۳ | ۱۹ | ۶/۴ | ۹ |
| بابلسر | - | - | - | - | ۱۲/۴ | ۱۳/۲ |
| زاهدان | - | - | ۱۵/۵ | ۱۶/۷ | ۱۹/۴ | ۷/۶ |

می‌کند. ذکر این نکته قابل توجه است که دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۱۰ سال در شهرهای ایران، تنها منوط به کاهش قیمت توربین به کمتر از ۲۹٪ قیمت کنونی است و در صورت کاهش قیمت توربین به ۱۰٪ قیمت کنونی به ترتیب استفاده از سیستم فروش مستقیم، متصل به شبکه و متصل به شبکه با باتری بازدهی اقتصادی در پی خواهند داشت.

۷- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به‌مرور مطالعات انجام‌شده پیرامون طراحی، آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی توربین کراس فلو پرداخته‌شده است. بدین منظور، پس از تقسیم‌بندی و معرفی انواع توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، به سراغ معرفی اجزا، ویژگی‌ها، کاربردها، معایب و مزایای توربین کراس فلو رفته، سپس تمامی پژوهش‌های منتشرشده با تمرکز بر طراحی و بهبود عملکرد توربین کراس فلو مورد بررسی و دسته‌بندی قرار گرفتند. این پژوهش‌ها سعی در بهبود عملکرد و افزایش کارایی توربین از طریق تغییر مشخصات هندسی توربین یا ارائه روشی برای هدایت جریان باد به درون توربین داشتند. روش‌های هدایت جریان باد که برای بادهای تک‌سویه مناسب‌اند، اعم از نازل راهنما، محفظه یا پوسته هدایت جریان، پره راهنما، منحرف‌کننده و روپوش بوده و روش‌هایی که قابلیت جذب بادهای چندجهته را دارند، شامل پره راهنمای چندجهته و زفیر هستند. عمده پژوهش‌ها بر روی پره راهنمای چندجهته انجام شده است.

توربین کراس فلو به دلیل سر و صدای کم، ثبات عالی، سرعت شروع کمتر از ۲ متر بر ثانیه، خاصیت خود راه‌انداز، قابلیت نصب در ارتفاع کم و هزینه اولیه ارزان گزینه بسیار مناسبی برای کاربردهای شهری و خانگی است؛ اما از طرفی روتور توربین به تنهایی حداکثر ضریب توان (در حدود ۰/۱۲) و بسته به نوع طراحی توربین این عدد متفاوت است) کوچکی دارد، که بیانگر لزوم ترکیب آن با روش‌های هدایت جریان باد به درون توربین است. همچنین استفاده از این توربین برای سه شهر اردبیل، بابلسر و زاهدان در ایران براساس سه نوع سیستم (سیستم فروش مستقیم، متصل به شبکه و متصل به شبکه با باتری) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و نتیجه گرفته شد که سیستم فروش مستقیم بهترین گزینه برای بهره‌وری از توربین کراس فلو در ایران است و دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۱۰ ساله تنها با کاهش قیمت توربین به ۲۹٪ الی ۱۰٪ قیمت کنونی حاصل می‌شود.



شکل ۲۲ نمودار دوره بازگشت سرمایه برحسب درصد کاهش قیمت توربین در سناریو متصل به شبکه و متصل به شبکه با باتری در ۳ شهر منتخب

در شکل ۲۲ در منحنی متصل به شبکه با باتری برای اردبیل و زاهدان، شکستگی مشاهده می‌شود، این شکستگی به دلیل جهش زمانی در سال دوازدهم که موعد مقرر برای تعویض باتری بوده، رخ داده است. در این سال هزینه ناشی از تعویض باتری، خالص جریان نقدی را به عددی منفی تبدیل کرده و موجب جهش ناگهانی (بد) معیارهای اقتصادی از جمله دوره بازگشت سرمایه می‌شود.

مشاهده می‌شود که در قیمت‌های کنونی تنها سیستم فروش مستقیم در اردبیل بازگشت سرمایه‌ای کمتر از طول عمر سیستم خواهد داشت؛ به‌علاوه، در همه شهرها دوره بازگشت سرمایه در سیستم فروش مستقیم کمتر از سیستم‌های متصل به شبکه است. به‌عبارت‌دیگر سیستم فروش مستقیم بهترین گزینه برای بهره‌وری از توربین کراس فلو در ایران است. از سوی دیگر سرعت و فرکانس باد در اردبیل بیشتر از زاهدان و بابلسر است، در نتیجه تولید انرژی توربین نیز بیشتر است و دوره بازگشت سرمایه در سیستم فروش مستقیم در اردبیل کوتاه‌تر از سایر شهرها خواهد بود.

با توجه به ارزش ریال در برابر دلار، تنها در صورت کاهش قیمت توربین به دلایلی همچون ساخت نمونه مشابه داخلی با قیمت تمام‌شده ارزان‌تر یا تخصیص یارانه دولتی برای پیاده‌سازی و اجرا در ایران ارزش اقتصادی پیدا



۸- فهرست علائم

| | | |
|-----------------------------|----------|-----------|
| مساحت سطح | m^2 | A |
| ضریب توان | - | C_P |
| ضریب گشتاور | - | C_T |
| قطر پره توربین | m | D |
| شتاب جاذبه | m/s^2 | g |
| ارتفاع توربین | m | H |
| ارتفاع شهر از سطح دریا | m | h |
| جرم هوای خشک | kg/mol | M |
| توان | W | P |
| فشار هوا | pa | P' |
| فشار استاندارد اتمسفر | pa | P_0 |
| شعاع نوک پره | m | R |
| ثابت ویژه گاز برای هوای خشک | $J/kg.K$ | \bar{R} |
| ثابت جهانی گازها | $J/kg.K$ | R_0 |
| گشتاور | Nm | T |
| سرعت خطی نوک پره | m/s | U |
| سرعت باد | m/s | V |

علائم یونانی

| | | |
|-----------------------|----------|-----------|
| زاویه حمله باد | deg | α |
| ضریب سرعت نوک | - | λ |
| چگالی | kg/m^3 | ρ |
| سرعت زاویه‌ای نوک پره | rpm | ω |

زیرنویس‌ها

| | | |
|-------------|---|-----|
| توان توربین | - | t |
| توان باد | - | w |

۹- مراجع

vertical axis turbine, *2009 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, St. John's, NL, Canada, pp. 1178–1183, 2009.

[15] T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume, E. Outa, and A. Usui, Optimum method of operating the wind turbine-generator systems matching the wind condition and wind turbine type, *World Renewable Energy Congress VI*, Brighton, UK, pp. 2348–2351, 2000.

[16] P. Rathod, K. Khatik, K. Shah, H. Desai, and J. Shah, A review on combined vertical axis wind turbine, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 5748–5754, 2016.

[17] A. Yusof and M. R. Mohamed, Vertical Axis Wind Turbines: An Overview, *Kasruddin Nasir A.N. et al. (eds) InECCE2019*, Springer, Singapore, pp. 821–835, 2020.

[18] *Screw wind Turbine*, Accessed 10 August 2021; https://en.wikipedia.org/wiki/Screw_turbine.

[19] *Swift wind Turbine*, Accessed 10 August 2021; <https://thefutureofthings.com/6387-swift-wind-turbine/>.

[20] *New Silent 'Eco Whisper' Wind Turbine is More Efficient Than Three Blade Models*, Accessed 10 August 2021; <https://inhabitat.com/new-silent-eco-whisper-wind-turbine-is-more-efficient-than-three-blade-models/>.

[21] *Nheowind Turbine*, Accessed 10 August 2021; <https://www.orionairsales.co.uk/nheowind-wind-turbine-3d-50-2kw-with-power-one-inverter-3455-p.asp>.

[22] *O'connor hush Turbine*, Accessed 10 August 2021; <https://www.jstor.org/stable/renetechsustfutu.9i5.16>.

[23] *WindCore Turbine*, Accessed 10 August 2021; <https://w3.windfair.net/wind-energy/news/5968-product-pick-of-the-week-the-windcore-domestic-wind-turbine>.

[24] *Windside Turbine*, Accessed 10 August 2021; <https://windside.com/>.

[25] *nr21 DESIGN STUDIO*, Accessed 20 October 2021; <https://nr21.com/lws/>.

[26] *Wind Power Consultant*, Accessed 20 October 2021; <https://windpowerconsultant.com/wind-flow-turbine-references/>.

[27] W. Tian, Z. Mao, and Y. Li, Numerical Simulations of a VAWT in the Wake of a Moving Car, *Energies*, Vol. 10, No. 4, pp. 478, 2017.

[28] W. Tian, Z. Mao, X. An, B. Zhang, and H. Wen, Numerical study of energy recovery from the wakes of moving vehicles on highways by using a vertical axis wind turbine, *Energy*, Vol. 141, pp. 715–728, 2017.

[29] *Wind Electric systems*, Accessed 10 August 2021; <https://www.arabenergy.de/windelectricsystems.html>.

[30] *Wind Energy*, Accessed 29 August 2021; https://www.coursera.org/learn/wind-energy?page=3&index=prod_all_products_term_optimization&tab=all#instructors.

[31] T. Kono, A. Yamagishi, T. Kiwata, S. Kimura, and N. Komatsu, Experimental and Numerical Investigation on the Flow Characteristics around a Cross-Flow Wind Turbine, *Energy Power Engineering*, Vol. 08, No. 04, pp. 173–182, 2016.

[32] T. Kawamura and Y. Sato, Numerical simulation of the flow around cross-flow wind turbine, *Research Institute for Mathematical Analysis*, Vol. 1288, No. 9, pp. 44–51, 2002.

[33] Shikha, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari, Vertical Axis Wind Rotor with Concentration by Convergent Nozzles, *Wind Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 555–959, 2003.

[34] S.-W. Son, P. M. Singh, and Y.-D. Choi, Influence of guide vane shape on the performance and internal flow of a cross flow wind turbine, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 163–169, 2013.

[35] Z. Arifin, D. D. P. Tjahjana, S. Suyitno, and W. E. Juwana, Performance of Crossflow Wind Turbines in In-line Configuration and Opposite Rotation Direction, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 81, No. 1, pp. 131–139, 2021.

[36] S. I. Pertiwi, D. D. Dwi Prija Tjahjana, and S. I. Cahyono, Experimental Study the Effect of Turbine Distance on Cross Flow Wind Turbine Performance in In-Line Configuration with Counter-Rotating Wind Turbine, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 71, No. 1, pp. 92–99, 2020.

[37] Fahrudin, D. D. D. P. Tjahjana, and B. Santoso, Experimental study of separator effect and shift angle on crossflow wind turbine

[1] G. Boyle, *Renewable energy: power for a sustainable future*, 1996.

[2] *Statistics renewable power plants*, Accessed 26 November 2021; <http://www.satba.gov.ir/fa/satba>.

[3] R. S. Amano, Review of Wind Turbine Research in 21st Century, *J. Energy Resour. Technol.*, Vol. 139, No. 5, 2017.

[4] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indrajha, and V. H. Krishna, A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 56, pp. 1351–1371, 2016.

[5] D. G. J. Marie, *Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current*, Google Patents, US1835018A, 1931.

[6] M. D'Ambrosio and M. Medaglia, *Vertical axis wind turbines: History, technology and applications*, 2010.

[7] R. E. Wilson and P. B. S. Lissaman, *Applied aerodynamics of wind power machines*, National Science Foundation, 1974.

[8] M. Ragheb, Vertical axis wind turbines, *University of Illinois at Urbana-Champaign*, Vol. 1, 2011.

[9] A. Das and P. K. Talapatra, Modelling and analysis of a mini vertical axis wind turbine, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 6, No. 6, pp. 184–194, 2016.

[10] S. J. Savonius, The S-rotor and its applications, *Mechanical engineering*, Vol. 53, No. 5, pp. 333–338, 1931.

[11] B. K. Kirke, *Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications*, PhD Thesis, Griffith University Australia, 1998.

[12] F. Atash, The deterioration of urban environments in developing countries: Mitigating the air pollution crisis in Tehran, Iran, *Cities*, Vol. 24, No. 6, pp. 399–409, 2007.

[13] C. D. Vidal, Design of a Savonius wind turbine for domestic use, MSc Thesis, University POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, 2019. (in Spanish)

[14] M. J. Alam and M. T. Iqbal, Design and development of hybrid



- A. Badarudinc, N. Nik-Ghazali, Performance investigation of a power augmented vertical axis wind turbine for urban high-rise application, *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 388–397, 2013.
- [58] K. H. Wonga, W. T. Chonga, H. T. Yapa, A. Fazlizana, W. Z. W. Omarbc, S. C. Poha, F. B. Hsiao, The Design and Flow Simulation of a Power-augmented Shroud for Urban Wind Turbine System, *Energy Procedia*, Vol. 61, pp. 1275–1278, 2014.
- [59] N. Korprasertsak and T. Leephakpreeda, Analysis and optimal design of wind boosters for Vertical Axis Wind Turbines at low wind speed, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 159, pp. 9–18, 2016.
- [60] W. Yahya, K. Ziming, W. Juan, M. S. Qurashi, M. Al-Nehari, and E. Salim, Influence of tilt angle and the number of guide vane blades towards the Savonius rotor performance, *Energy Reports*, Vol. 7, pp. 3317–3327, 2021.
- [61] R. Nobile, M. Vahdati, J. F. Barlow, and A. Mewburn-Crook, Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 125, pp. 168–179, 2014.
- [62] K. Popea, V. Rodriguesa, R. Doyleab, A. Tsopelasa, R. Gravelinsina, G. F. Naterera, E. Tsang, Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 5, pp. 1043–1051, 2010.
- [63] K. Pope, I. Dincer, and G. F. Naterer, Energy and exergy efficiency comparison of horizontal and vertical axis wind turbines, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 9, pp. 2102–2113, 2010.
- [64] *Enactment to guarantee the purchase of electricity produced by renewable and clean power plants*, Ministry of Power, Iran, No. 1400/15224/20/100, 2021. (in persian).
- [65] *Enactment to guarantee the purchase of electricity produced by renewable and clean power plants* Ministry of Power, Iran, No. 1398/33560/20/100, 2019. (in persian).
- [66] *Notification of guaranteed purchase price of electricity from renewable and clean power plants*, Ministry of Power, Iran, No. 95/14273/30/100, 2016. (in persian).
- [67] *Notification of guaranteed purchase price of electricity from renewable and clean power plants*, Ministry of Power, Iran, No. 95/14273/30/100, 2015. (in persian).
- [68] *Guaranteed electricity purchase tariffs from renewables*, Accessed 20 October 2021; <http://www.satba.gov.ir/fa/guidance/guidance>.
- [69] *LWS micro turbine til tag eller hjørne montage 50 | Campen Auktioner A/S*, Accessed 1 August 2021; <https://campenauctioner.hibid.com/lot/36479802/lws-micro-turbine-til-tag-eller-hj-rne-montage--50/?q=&ref=catalog>.
- performance, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1931, p. 030044, 2018.
- [38] D. M. Kurniawati, D. D. D. P. Tjahjana, and B. Santoso, Experimental investigation on performance of crossflow wind turbine as effect of blades number, *AIP Conference Proceedings*, pp. 030045, 2018.
- [39] D. A. Makarim, D. D. D. P. Tjahjana, S. I. Cahyono, and S. A. Mazlan, Performance investigation of the crossflow water turbine by using CFD, *AIP Conference Proceedings*, p. 030083, 2019.
- [40] D. Oktavitasari, P. Kurniawan, D. D. D. P. Tjahjana, and S. A. Mazlan, Study of the wind farm arrangements and wake characteristic using numerical simulation for crossflow wind turbine, *AIP Conference Proceedings*, p. 030009, 2019.
- [41] B. Santoso, D. D. D. P. Tjahjana, and G. P. Picaso, A cross-flow turbine turned with non-uniform flow velocity on the cooling tower, *AIP Conference Proceedings*, p. 030049, 2018.
- [42] S. Susanto, D. D. D. P. Tjahjana, and B. Santoso, Experimental tests of the effect of rotor diameter ratio and blade number to the cross-flow wind turbine performance, *AIP Conference Proceedings*, p. 030042, 2018.
- [43] D. D. D. P. Tjahjana, P. Purbaningrum, S. Hadi, Y. A. Wicaksono, and D. Adiputra, The study of the influence of the diameter ratio and blade number to the performance of the cross flow wind turbine by using 2D computational fluid dynamics modeling, *AIP Conference Proceedings*, p. 030034, 2018.
- [44] A. Wibowo, D. D. D. P. Tjahjana, B. Santoso, and M. R. C. Situmorang, Study of turbine and guide vanes integration to enhance the performance of cross flow vertical axis wind turbine, *AIP Conference Proceedings*, p. 030043, 2018.
- [45] Y. A. Wicaksono, D. D. D. P. Tjahjana, and S. Hadi, Influence of omni-directional guide vane on the performance of cross-flow rotor for urban wind energy, *AIP Conference Proceedings*, p. 030040, 2018.
- [46] J. Fukutomi, T. Shigemitsu, and H. Daito, Study on performance and flow condition of a cross-flow wind turbine with a symmetrical casing, *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 133, No. 5, pp. 1–9, 2011.
- [47] T. Shigemitsu, J. Fukutomi, and M. Toyohara, Performance and flow condition of cross-flow wind turbine with a symmetrical casing having side boards, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 169–174, 2016.
- [48] T. Tanino, S. Nakao, and G. Uebayashi, “Improving ambient wind environments of a cross-flow wind turbine near a structure by using an inlet guide structure and a flow deflector, *Journal of Thermal Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 242–248, 2005.
- [49] B. Santoso and D. D. D. P. Tjahjana, The Influence of Guide Vane to the Performance of Cross-Flow Wind Turbine on Waste Energy Harvesting System, *MATEC Web of Conferences*, Vol. 159, p. 02014, 2018.
- [50] T. Wenlong, S. Baowei, and M. Zhaoyong, A Numerical Study on the Improvement of the Performance of a Banki Wind Turbine, *Wind Engineering*, Vol. 38, No. 1, pp. 109–116, 2014.
- [51] T. Shigemitsu, J. Fukutomi, and Y. Takeyama, Study on Performance Improvement of Cross-Flow Wind Turbine with Symmetrical Casing, *Journal of Environment and Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 490–501, 2009.
- [52] K. Takeuchi, J. Fukutomi, H. Kodani, and H. Horiguchi, Study on Performance and Internal Flow of Cross-Flow Wind Turbine, *ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 597–602, 2003.
- [53] A. Ali, S. Golde, F. Alam, and H. Moria, Experimental and Computational Study of a Micro Vertical Axis Wind Turbine, *Procedia Engineering*, Vol. 49, pp. 254–262, 2012.
- [54] F. Alam and S. Golde, An Aerodynamic Study of a Micro Scale Vertical Axis Wind Turbine, *Procedia Engineering*, Vol. 56, pp. 568–572, 2013.
- [55] B. Loganathan, H. Chowdhury, I. Mustary, and F. Alam, An Experimental Study of a Cyclonic Vertical Axis Wind Turbine for Domestic Scale Power Generation, *Procedia Engineering*, Vol. 105, pp. 686–691, 2015.
- [56] W. T. Chong, A. Fazlizan, S. C. Poh, K. C. Pan, W. P. Hew, and F. B. Hsiao, The design, simulation and testing of an urban vertical axis wind turbine with the omni-direction-guide-vane, *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 601–609, 2013.
- [57] W. T. Chonga, K. C. Pana, S. C. Poha, A. Fazlizanab, C. S. Oona,

